建立番木瓜果園土壤碳匯增進之栽培模式

徐智政[1]、陳薪喨[1]、李文立[2]

[1]農業部農業試驗所鳳山熱帶園藝試驗分所熱帶果樹系

[2]農業部農業試驗所鳳山熱帶園藝試驗分所

摘要

本試驗針對台灣熱帶果樹栽培管理技術以增進土壤碳匯效益進行分析，重點在於提升土壤有機質和改善土壤結構。主要措施包括施用有機質肥料、覆蓋植株殘體、實施草生栽培以及減少耕犁。這些方法能夠促進碳固定並增強土壤保水保肥能力。在國內番木瓜主要產區之不同耕作管理方式進行評估顯示，利用草生栽培管理在提升土壤有機質和有機碳含量方面優於傳統銀黑塑膠布覆蓋，除了可降低土壤表面溫度和維持較高的土壤濕度外，更能提供更高的碳儲量。建立草生免耕試驗中，土壤溫度和濕度可維持較為穩定。此管理策略能有效增強果園碳匯，並提高植株對環境逆境的韌性，是應對氣候變遷和促進可持續農業的可行方案。

關鍵詞：番木瓜、土壤碳匯、草生栽培、免耕處理

緒言

自工業革命以來，全球碳排放量急速上升，導致全球乾旱、熱浪、洪水、颱風等極端氣候災情頻傳，對於農業生產活動影響甚鉅及許多國家及自然生態受到嚴重威脅。為減緩全球暖化加劇氣候變遷的趨勢，減少碳排放量勢在必行，因此，如何利用負碳技術減少大氣中溫室氣體含量為當前重要課題之一。所謂「自然碳匯」為將二氧化碳以不同形式儲存於大自然中，包含儲存於土壤的黃碳、森林的綠碳及海洋與濕地的藍碳。土壤儲存二氧化碳方式並非直接吸收固定，而是透過植物行光合作用吸收二氧化碳，死亡後微生物分解，大部分變回二氧化碳回到大氣，少部分形成有機質封存於土壤中。有機質形成過程受到雨量、土壤質地、農事操作、土壤微生物等因子影響，尤其台灣屬熱帶潮濕氣候，年均降雨量約為2,500 mm，平地年均溫約為24℃，高溫多雨之環境會增加土壤微生物活性，導致植物體死亡後只有極少部分可形成有機質儲存於土壤中。土壤碳匯以延緩土壤有機質分解或增加有機質累積為常見方法，本計畫將盤點並評估國內果樹可運行的增匯措施，包括可透過推廣具負碳功能之作物品種，藉由免耕或低耕犁栽培模式、草生 栽培、施用土壤微生物及有機質肥料、種植綠肥作物、殘株回田或生物炭等以增加土壤有機質 (Bai *et al.*, 2022)。此外，進一步針對國內番木瓜果園不同覆蓋方法之耕作管理模式評估基線碳匯量，未來將跨域合作建立土壤碳匯量測方

法，建置土壤碳儲潛力分區圖，強化果園低碳栽培之土壤管理模式，綜合評估農業生產的碳匯效益，方能凸顯土壤增匯方式對農民的誘因，進而促進農業土壤碳交易的實際運作並建立友善減碳及碳匯之農業環境。

材料與方法

一、盤點彙整熱帶果樹碳匯栽培管理措施，評估其施作方法與慣行農法之搭配並進行其土壤碳匯量變化估算，建立可行之碳匯增進管理模式。

二、分析番木瓜果園候選場址之土壤基礎物化性質、有機碳含量及環境數據，確立場址土壤類型及土壤基礎碳庫存 (baseline carbon stock)：

(一) 試驗地點：國內重要番木瓜產區 (南投縣埔里鎮 3 處、屏東縣高樹鄉及新埤鄉各 1 處)。

(二) 試驗處理：調查候選試區農民栽培管理方式 (耕犁頻度、矮化方式)，防治雜草方式 (草生栽培、遮陰網、銀黑塑膠布)、有機資材施用習慣 (種類、使用量、施用方法) 對土壤碳儲量效益之評估。

三、建立草生免耕處理對番木瓜果園土壤碳儲量之評估：

(一) 試驗地點：鳳山熱帶園藝試驗分所番木瓜果園。

(二) 試驗處理：於鳳山試區設置免耕與草生栽培之試驗組及目前農戶之慣行方式採雙行植並舖設覆蓋資材 (銀黑塑膠布及抑草蓆) 為對照組。定期採樣並記錄 2 種不同栽培模式對果園微氣象田間監測數據、土壤相關分析、植株生長與病蟲害危害等評估，每年分別調查各處理區 0－30 cm 土壤碳儲量、土壤總體平均密度及各元素含量變化，進一步綜整現有農民常用之耕作管理方式調查資料及草生免耕資料，評估草生栽培對番木園碳匯之影響。

四、土壤碳儲基線量測

(一) 採樣方法

現有耕作管理模式番木瓜果園土壤採樣以評估基線碳儲量：於番木瓜主要產區屏東新埤 (全園塑膠布)、南投埔里 (草生 / 遮陰網)、屏東高樹 (草生 / 塑膠布)、鳳山分所(草生免耕 / 一般慣行)等進行採樣，以建立番木瓜果園土壤碳儲分布。於各處理區塊隨機採樣5 點混合為一樣本，土芯深度表土0－30 公分。分析土壤總體密度、總有機碳含量 (乾燒法)。

(二) 檢測項目

主要檢測各樣本之土壤總體密度、總有機碳含量與各營養元素之含量等並換算有機碳比例，分析不同栽培管理模式下土壤累積之碳含量變化及果樹作物碳匯效益。

結果與討論

一、熱帶果樹增進碳匯之栽培管理措施

台灣常見果樹的農業管理技術中，有一些措施可以有效增加土壤碳儲存，這些措施的核心目標是提升土壤的有機質含量，增強土壤結構，從而促進碳的固定。以下是一些具體的技術方法以及主要果樹作物的運作機制 (表1)：

(一) 施用有機質肥料：在果園中施用有機肥可提高土壤肥力、改善果樹健康，進而提高果樹產量和品質。一般在二期作之間或快速生長期 (如開花期、幼果期) 以基肥或追肥之方式補充營養，除了促進果樹的生長和果實發育外，因有機肥中的有機質能有效改善土壤的物理結構，並促進土壤中有益微生物的生長繁殖，進而增強土壤微生物活動增加碳的種類以支持不同微生物共存增加微生物多樣性，並使土壤疏鬆、透氣性好，增強土壤的保水、保肥能力、促進團粒形成與土壤中碳的物理性保護，使碳儲不容易流失，提升碳儲的穩定性與韌性。

(二) 覆蓋植株殘體：植物在生長過程中通過光合作用將大氣中的碳固定，將修剪後的枝條和果樹落葉粉碎後還田，這些材料會在微生物的作用下分解為有機質，從而增加土壤碳儲量。如芒果、棗子、柑橘園、番石榴、蓮霧、百香果等樹枝繁葉茂，修剪後的枝條和落葉可作為還田材料，直接增加土壤的有機碳或定期以追肥之方式添加有機肥，果園經由敷蓋殘體透過降低土壤溫度，以減緩土壤微生物呼吸，進而穩定有機碳的比例，使土壤碳儲存趨於平衡，長期而言，不僅增加土壤有機機質含量，也改善團粒結構與保水性。

(三) 種植覆蓋作物 (草生栽培)：草生栽培是一種在果樹園中不清除地表草坪或進行野草覆蓋的耕作方式，草生層可覆蓋土壤表面，減少太陽輻射吸收，除可使日間土壤溫度下降、在夜間具有保溫作用。，此環境可抑制微生物呼吸高峰，減少CO_2 排放, 以延長碳滯留時間，草生栽培除了增加土壤有機質，可減少土壤表層蒸發與雨滴沖蝕，保持土壤表層濕度，還可增加土壤的孔隙度有助於穩定氧氣交替之微環境氣候；草生栽培草種根系與土壤表層可防止表土流失，將有機碳固定於土壤，避免水土流失而減少侵蝕與碳流朱以提供穩定的碳源，並可穩定土壤微氣候與水份，進而增加土壤微生物與土壤動物多樣性，並促進土壤團粒與礦物結合而穩定有機質在土壤中的累積，進而提升土壤碳儲存能力。

(四) 降低耕犁：耕犁會破壞土壤孔隙結構，增加氧氣滲入與有機碳氧化速率以會加速土壤中的有機質分解並釋放出二氧化碳，減少耕作後，土壤孔隙較封閉，氧氣通量下降以減少微生物有氧呼吸強度，使碳氧化轉為CO_2 的速率下降。有助於提高土壤中的碳儲含量。另外耕犁會破壞團粒結構，釋放原本被包覆於團粒結構中的有機質，降低耕犁使土壤團粒結構較完整保存，保護土壤中原有的碳儲存；土壤頻繁的耕犁會均質化土壤環境，導致土壤多樣性下降，降低耕犁可保留原本有益微生物多樣性並可保持土壤的結構完整，提供更加穩定的生物棲息環境。

表 1. 台灣常見果樹農業管理技術對增加土壤碳儲存的方法及主要作物機制。
Table 1. Agricultural Management Techniques for Common Fruit Trees in Taiwan to Increase Soil Carbon Storage and the Mechanisms of Major Crops.

農業管理技術	果樹種類	對土壤碳儲存之主要作用機制			
		降低溫度	降低氧氣	增加土壤生物多樣性	增加土壤穩定有機物
施用有機物	果樹於產期結束施禮肥或特定生長時期施用追肥之方式：如芒果、香蕉、棗子、柑橘園、番石榴、蓮霧、百香果...等			●	●
敷蓋殘體	番石榴、番荔枝、酪梨、蓮霧、棗子	●		●	●
種植覆蓋作物/草生栽培	芒果、香蕉、棗子、柑橘園、番石榴、荔枝、木瓜、紅龍果	●		●	●
免耕/最少耕犁	一般長期果樹平均約 5-7 年耕犁更新		●	●	●

二、分析現有耕作管理方式對番木瓜碳匯效益之可行性評估

番木瓜 (Carica papaya L.) 為半草本之熱帶果樹，為台灣重要經濟果樹，栽培面積約2,730 公頃，目前經濟栽培品種為台農2 號，約占總栽植面積之90%。國內番木瓜主要種植於網室以防止輪點毒素病危害。番木瓜根系為草質淺根性作物，根系如淹水1－2 天便會樹勢衰弱或導致根系腐爛，進而嚴重影響產量，因此除栽培果園宜選擇排水良好及地下水位低外，在整地作業時會先將田地整出洩水坡度及四周洩水道，再以大型機械整成雙行畦或單行畦，務求水路通暢為原則，另外，一般番木瓜農戶會以銀黑塑膠布或抑草蓆為覆蓋資材以防止夏季豪雨直接沖刷根部與防治雜草避免水分及養分的競爭及維持冬季土溫，但夏季高溫易造成土壤溫度上升，豪雨過後土壤水份不易散失等問題，嚴重則影響木瓜生育，甚至導致植株死亡。本試驗調查目前南部高屏地區番木瓜田區無論是單行畦或雙行畦以銀黑塑膠布或抑草蓆為覆蓋資材，嘉義及台南地區則有農戶以覆蓋資材及草生併行，但有少數農戶則以全園草生栽培模式。雖然利用覆蓋資材短時間上有許多優點，但長期以環保及碳匯觀點來看，生態管理方式也許是木瓜果園增加碳匯及提高植株對氣候變遷韌性的另一個選項。網室木瓜因日照通風不良且溫度高於網外溫度，導致植株易徒長、莖細、結果部位高；易遭風害，且採收管理不便，一般木瓜果農於栽培初期進行倒株作業以延長採收期，但如此耕作模式平均約2－3 年需重新將植株砍除及將田區翻耕以更新果園，除容易導致土壤有機質含量分解加速進而減少土壤碳含量，另外也會讓僅存的雜草更加頑強，而耐耕犁、無性繁殖體雜草種類也會增加，徒增果農清除防治成本，果園生物多樣性降低。本試驗目前已於屏東縣新埤鄉、高樹鄉、南投縣埔里鎮建立4 處番木瓜試驗場域，已完成土壤深度30 公分採樣共4 處，進行土壤質地及相關肥力分析以建立含碳儲量基線並測定不同管理方式對番木瓜果園土壤表面溫度之測定。

在屏東高樹番木瓜果園其有機碳含量平均為0.63－0.82%，其中利用草生栽培區域處理之碳儲量為31.34 ± 1.18 ton C ha^{-1}，較銀黑塑膠布覆蓋處理25.05 ± 1.53 ton C ha^{-1}為高；在南投埔里有機栽培番木瓜果園其草生栽培區域之碳儲量為50.28 ± 1.15 ton C ha^{-1}，較覆蓋抑草蓆 (49.40 ± 1.28 ton C ha^{-1}) 及裸土區域 (43.54 ± 1.38 ton C ha^{-1}) 高；而在屏東新埤番木瓜果園採全園覆蓋銀黑塑膠布，有機碳含量0.83 ± 0.19%及碳儲量為38.31 ± 1.28%。綜合不同番木瓜產區覆蓋方式的土壤碳儲量均有差異，目前初步結果顯示，以有機栽培有機碳含量較一般慣行高，慣行栽培模式中草生栽培管理覆蓋方式較銀黑塑膠布之有機碳含量高 (表2)。進一步測定不同管理方式之番木瓜果園土壤表面溫度變化顯示，如果園利用草生栽培覆蓋，其土壤表面溫度與番木瓜植株葉片表面溫度較為相近，但利用抑草蓆或塑膠布覆蓋其土壤表面溫度與草生栽培溫度差近20°C 以上，因此不同耕作管理模式中，利用草生栽培可明顯降低土壤表面溫度，另留草高度也明顯影響土壤表面溫度 (圖1)。

表2. 現有耕作方式對番木瓜果園土壤有機質之影響。

Table 2. The Effects of Current Cultivation Practices on Soil Organic Matter in Papaya Orchards.

管理方式	覆蓋方式	總體密度 (g cm^{-3})	有機碳含量 (%)	碳儲量 (ton C ha^{-1})
慣行栽培 (屏東高樹)	草生	1.47 ± 0.08	0.82 ± 0.14	31.34 ±1 .18
	銀黑塑膠布	1.44 ± 0.03	0.63 ± 0.08	25.05 ± 1.53
有機栽培 (南投埔里)	草生	1.13 ± 0.13	1.25 ± 0.11	50.28 ± 1.15
	抑草蓆	1.64 ± 0.05	1.15 ± 0.13	49.40 ± 1.28
	裸土	1.62 ± 0.06	1.04 ± 0.12	43.54 ± 1.38
慣行栽培 (屏東新埤)	銀黑塑膠布	1.44 ± 0.15	0.83 ± 0.19	38.31 ± 1.28

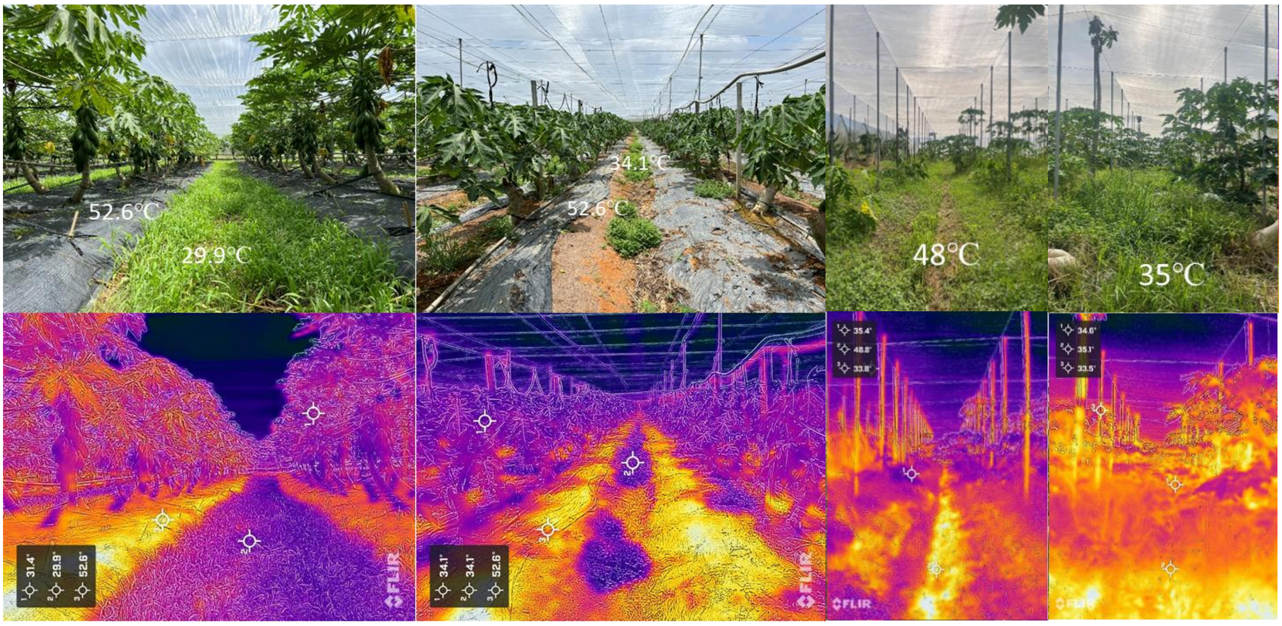

圖 1. 不同管理方式之番木瓜果園土壤表面溫度。

Fig.1. Soil Surface Temperature of Papaya Orchards Under Different Management Practices.

三、建立草生免耕處理對番木瓜果園對土壤微氣候及碳儲量之影響評估

台灣地區高溫、暴雨、乾旱、缺水等頻率將日益增加，唯有設法提高果樹的韌性才能克服該等逆境，除選育抗逆境品種外，應鼓勵果園土壤保育，阻止土壤流失。將番木瓜現行之耕種栽培模式施行草生栽培，果園生質回土，增施有機肥，可提高土壤碳儲量，改善土壤物理性、化學性和生物性。不僅減緩氣候變遷，還因增加土壤有機質，土壤孔隙度隨之提高，進而增加換氣率、滲水率，提高保水、保肥力。因此，本試驗選擇適合番木瓜果園之草生栽培草種及不施行翻耕作業之留側芽更新或二次倒株等方式矮化以延長植株採收期與原地更新種苗，並搭配植株殘體覆蓋以降低耕犁次數並以滴灌取代噴灌等不同管理模式下增加土壤碳累積，將土地利用轉向多年生作物系統，以增強碳的保存。鳳山試區設置免耕與草生栽培之試驗組，並以目前農戶之慣行方式採雙行植並舖設覆蓋資材 (銀黑塑膠布及抑草蓆) 為對照組，定期採樣並記錄二種不同栽培模式對果園微氣象田間監測數據、土壤性質、植株生長與病蟲害危害等評估，結果顯示：利用紅外線光譜儀測定不同覆蓋處理對土壤表面溫度之影響中，利用草生栽培可明顯降低土壤表面溫度，其中以塑膠布表面溫度最高 (54.3℃) 其次為抑草席 (42.2℃)，最低為草生栽培 (35 – 37℃) ，另割草高度也明顯影響土壤表面溫度 (圖2)。番木瓜果園不同覆蓋方式對不同深度 (10 – 30 cm) 土壤溫度具有差異性；以覆蓋塑膠布處理平均土壤溫度高，其次為草生栽培，最低為抑草蓆處理；不同覆蓋處理皆以土層30 公分之土壤溫度變動性較小；整體而言，隨著大氣溫度變化以免耕草生栽培之土壤各土層平均溫度變動較小 (圖3)；在濕度方面；以草生免耕栽培處理各土層平均土壤濕度 (46.27%) 較佳，其次為覆蓋抑草蓆 (45.87%)，二者處理差

異不大，塑膠布處理平均土壤濕度較低 (26.07%)；整體而言，免耕草生栽培與覆蓋雜草抑制蓆對土壤保濕程度效果相似 (圖4)。

草生免耕區域土壤總體密度為1.13 ± 0.11 g cm^{-3}、有機碳含量2.05 ± 0.14%、碳儲量為70.43 ± 1.17 ton C ha^{-1}；一般慣行區域土壤總體密度1.65 ± 0.03 g cm^{-3}、有機碳含量1.17 ± 0.12%、碳儲量為54.25 ± 1.40 ton C ha^{-1} (表3)，此土壤採樣時間為試區初建置時處理前之土壤相關數據，待經不同時間處理後之土壤採樣觀察其土壤相關數據變化。

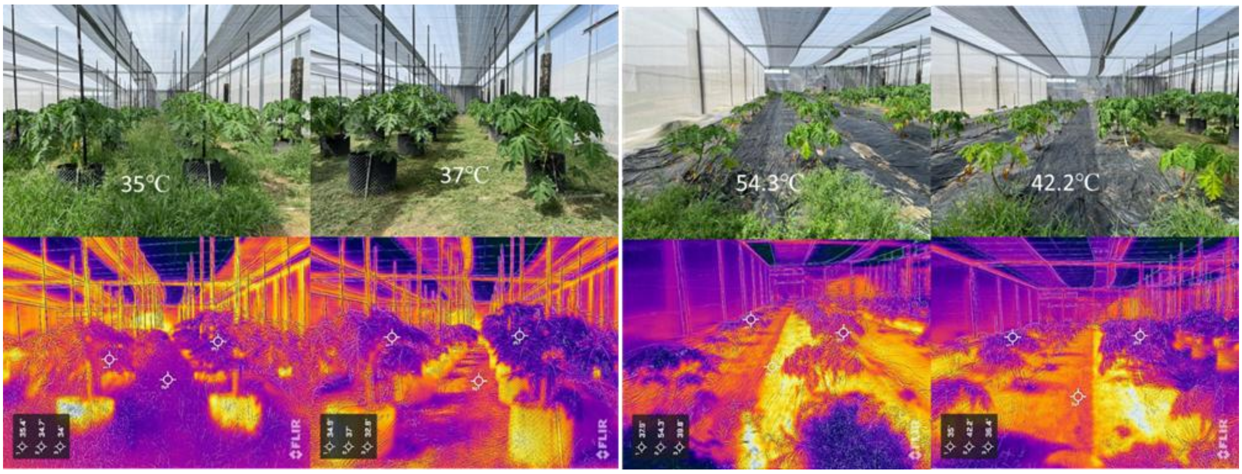

圖 2.不同覆蓋及管理方式對番木瓜果園土壤表面溫度之測定。

Fig.2. Measurement of Surface Soil Temperature in Papaya Orchards Under Different Mulching and Management Practices.

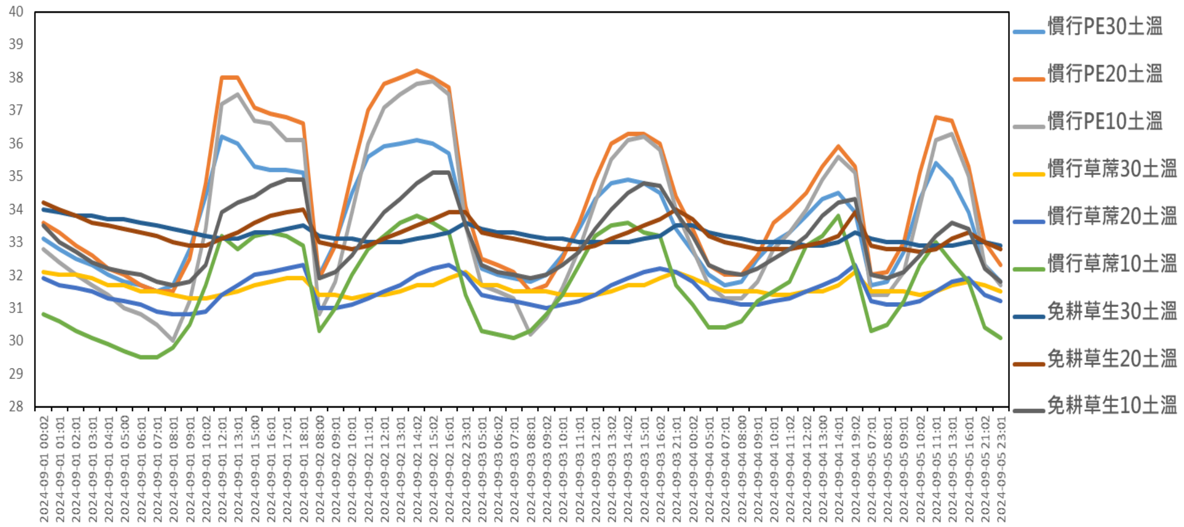

圖3. 番木瓜果園不同覆蓋方式對不同深度土壤溫度變化。

Fig.3. Soil Temperature Variation at Different Depths Under Different Mulching Practices in Papaya Orchards.

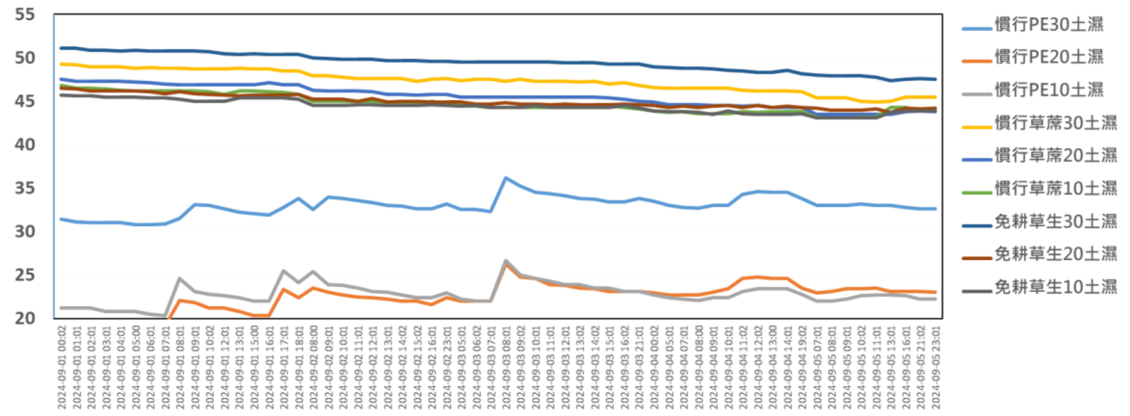

圖4. 番木瓜果園不同覆蓋方式對不同深度土壤濕度變化。

Fig.4. Soil Moisture Variation at Different Depths Under Different Mulching Practices in Papaya Orchards.

表3. 不同耕作管理方式對番木瓜果園土壤有機質之影響。

Table 3. Effects of Different Cultivation Management Practices on Soil Organic Matter in Papaya Orchards.

管理方式	覆蓋方式	總體密度 (g cm^{-3})	有機質 (%)	有機碳含量 (%)	碳儲量 (ton C ha^{-1})
草生免耕	草生栽培	1.13 ± 0.11	3.48 ± 0.14	2.05 ± 0.14	70.43 ± 1.17
一般慣行	塑膠布/抑草蓆	1.65 ± 0.03	2.05 ± 0.13	1.17 ± 0.12	54.25 ± 1.40

引用文獻

1. Bai, Y., and M. F. Cotrufo. 2022. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. Science 377(6606):603－608.
2. Brady, N. C., and R. R. Weil, 2010. Elements of the nature and properties of soils. Pearson Prentice Hall.
3. Chen, C. L. , C. Y. Chou, M. C. Lin, and J. H. Hu. 2019. Application of Agricultural Practices to Increase Soil Carbon Sequestration in Taiwan. Climate Smart Agriculture for the Small-Scale Farmers in the Asian and Pacific Region. pp. 89 – 105. National Agriculture and Food Research Organization (NARO) & Food and Fertilizer Technology Center (FFTC) for the Asian and Pacific Region. ISBN:978 – 4 – 908914 – 02 – 7.
4. Executive Yuan (EPA). 2020. 2020 REPUBLIC of CHINA National Greenhouse Gas Inventory Report. Environmental Protection Administration,Executive Yuan (EPA). (in Chinese)
5. Guo, L. B. and R. M. Gifford. 2002. “Soil carbon stocks and land use change: a

meta analysis." Global Change Biology 8(4): 345 – 360.

6. IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland..
7. IPCC. 2018. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.

Establishment of Cultivation Models for Enhancing Soil Carbon Sequestration in Papaya Orchards

Chih-Cheng Hsu[1], Hsin-Liang Chen[1], and Wen-Li Lee[2]

[1]Department of Tropical Fruit Trees, Fengshan Tropical Horticultural Experiment Branch, Taiwan Agricultural Research Institute, Ministry of Agriculture.

[2]Fengshan Tropical Horticultural Experiment Branch, Taiwan Agricultural Research Institute, Ministry of Agriculture.

ABSTRACT

This study analyzed tropical fruit cultivation and management practices in Taiwan aimed at enhancing soil carbon sequestration, with a focus on increasing soil organic matter and improving soil structure. Key measures include the application of organic fertilizers, mulching with plant residues, implementation of sod culture (cover cropping), and reduction of tillage. These practices promote carbon fixation while enhancing the soil's water retention and fertility. Evaluations of different cultivation management methods in major papaya production areas in Taiwan indicated that sod culture outperformed traditional silver-black plastic mulch in terms of increasing soil organic matter and organic carbon content. In addition to lowering soil surface temperature and maintaining higher soil moisture, sod culture also provided greater carbon storage. Trials on sod culture with no-tillage demonstrated more stable soil temperature and moisture. This management strategy effectively enhances orchard carbon sequestration capacity and improves plant resilience to environmental stress, making it a feasible approach for addressing climate change and promoting sustainable agriculture.

Key words: papaya, soil carbon sequestration, sod culture, no-tillage.